

国外大尺度动力过程研究和中期 数值天气预报的进展^{*}

吴 国 雄

(中国科学院大气物理研究所)

第二次世界大战后,随着观测资料的增多、探测手段的改善、计算技术的发展以及数学、物理等学科的推进,动力气象学在资料分析、理论研究和数值模拟三个不同方向齐头并进、蓬勃发展。到六十年代中期,人们对大气活动的认识已深化到如此的程度,以至能够而且必须对经典的动力气象学从资料和理论的不同角度加以总结。Palmén, E. 和 Newton, C. (1969) 的“大气环流系统”及 Lorenz, E. (1967) 的“大气环流的性质和理论”等杰作因此便应运而生了。

与此同时,近代动力气象学结束了自身的胎动,在其幼年期就以“令人惊讶”的步伐迈涉不同的天地。气象学家们则以“不甚从容”的步伐参加了 WMO 及 IAMAP (国际气象学和大气物理学协会) 等组织的 Reading (1981)、Humberg (1981, 1983) 及 Paris (1983) 会议,去捕捉和预测现代动力气象学的行踪。概括这一阶段发展的代表作“Large-scale dynamical processes in the atmosphere” (Hoskins, B. 和 Pearce, R. 编, 1983)^[1], 就是 Reading 和 Humberg 会议上典型报告的汇集。

数值天气预报作为大气物理学的应用学科,在五十年代初由于 Charney, J., Fjortoft, R. 和 Von Neumann 的杰出贡献而获新生。大气环流的数值模拟则由于 Phillips, N. (1956) 的创举在五十年代脱颖而出。到了六十年代中期,复杂的原始方程模式使短期数值预报($t \leq 2$ 天)日臻完美;大气环流的模拟研究则在时间谱的另一端($T \rightarrow \infty$)获得辉煌成就 (Smagorinsky, J. 等, 1965)。正如 Von Neumann (1955) 所预言的,计算和理论在时间谱的两个极端获得突破之后,中期数值天气预报便紧步后尘;由于 Miyakoda, K.^[2] 不懈的努力,第一个十五天中期预报试验结果于 1972 年在 GFDL (美国地球物理流体动力学实验室) 问世。新的突破催化着欧洲中期预报中心 (ECMWF) 的组建。经过三年的筹备,该中心终于在 1979 年作为全世界第一个(也是当时唯一的一个)中期数值预报业务中心问世。欧洲气象界按照 Rossby (1951) 的忠告,终于摒弃昔日孤立研究

1985年7月24日收到,12月27日收到修改稿

• 根据校庆二十五周年的报告整理

的习俗,在同一个大气内、朝着同一个目标、用同一个步调奋战。这种协作精神加上不断摄取世界科技成就的最新营养的高代价的决策,使得 ECMWF 到 1982 年已经使短、中期数值预报在全世界处于领先地位。1985 年 5 月 1 日起,新一代谱模式——T₁₀₆ 已投入业务,1986—95 年 ECMWF 的十年规划也已订出。可以预言,未来十年中,中期数值天气预报又将有一个新飞跃。

本文将当前国外动力气象理论及中期数值预报的进展作一简要介绍。

一、动力气象理论的进展

过去近二十年,大气动力学发展的重要特征是从带状(或二维)、定常、线性、半球和孤立的动力系统进入三维、瞬变、非线性、全球和综合(包括海气、地气、海冰等)的动力系统。

1. 球面 Rossby 波

在我国气象学家曾庆存发展系统的波包理论的同时, Hoskins 等^[3]也从理论和数值模拟中证明了球面上二维 Rossby 波的存在及其频散关系。这是继 Rossby 的正压波动学说(1939)、叶笃正的能量频散理论(1949)后,大气波动学说的第三个重要发展。该理论指出,外界扰源所激发的 Rossby 波的群速度 \vec{C}_g 是沿地球的一个大圆路径,而不是沿纬圈。 \vec{C}_g 的大小正比于基流速在大圆上投影的 2 倍。由于扰动流函数振幅的平方 ψ^2 与经向波数 l 的乘积为常数,因此向北的波列增幅而向南的波列减幅。这与 Bretherton, F. 和 Garrett, C. (1969) 得到的关于“波作用沿波射线方向守恒” $\left[V_g \Lambda = V_g E (\omega - k\bar{u})^{-1} = \text{常数} \right]$ 的重要结论是一致的。由简单的几何光学,从该理论可导出:波列总是向折射率大的介质折射;它在转向纬度上 ($l=0$) 被反射,在临界纬度 ($\bar{u}=0$, 即 $l \rightarrow \infty$) 处被反射、吸收。这一理论曾被用来解释大气中的低频振荡及遥相关等流型分布,也很好说明了中高纬大气环流对低纬度扰源的响应远比对中纬度同强度扰源的响应强这一现象。但由于在导出该理论时所用的 WKB 方法在转向纬度及临界纬度附近均不满足必要条件 ($P'(y) \ll 2p^{3/2}(y)$), 加之线性近似的极限, Rossby 波列在转向和临界纬度附近的状况仍有待研究。

2. 定长波

定长波的理论逐渐完善。一般地仍认为机械和热力强迫作用是定长波的外因。理论和模拟证明,在对流层低层,热力强迫作用是主要的;在高层,机械和热力作用两者均重要。在无摩擦场合,行星波与地形反位相,而短波与地形同位相。在有摩擦时,波脊在地形上游。

热力强迫的定长波结构则取决于平衡非绝热加热的形式和热源的垂直结构。在低纬度,外部加热主要由绝热对流所平衡;当热源随高度减少(增加)时,低层低压位于热源下(上)游。在中高纬,当加热为纬向平流所平衡时,热源下游为暖低压;当为经向平流所平衡时,下游低压的性质由热源垂直结构决定 (Karoly and Hoskins, 1981)^[3]。

研究还指出,定常波在垂直向和南北向的传播取决于纬向风场结构。在垂直方向,只有当西风风速小于临界风速($=\overline{q_y}(k^2+n^2)^{-1}$)时,波动才能向上传播加强,否则是减幅的(Charney and Drazin, P. 1961)^[4]。波在南北向的传播也受类似的约束(Charney, 1969)。这很好地解释了为何在平流层波数 1 和 2 占主导地位。Edmon, H. J. 等(1981)^[5]发现 EP 通量是经向平面上波活动(用 $A = \frac{1}{2} \frac{\overline{q^* \lambda}}{q_y} / \overline{q_y}$ 表征)传播的指示因子。

Matsuno, T. (1970) 得到定常行星波折射率 Q 的表达式为 $Q = \overline{q_y} / \overline{u}$ 。Labitzke, K. (1982) 发现在平流层主要爆发性增温前几周常有波活动强化的现象。因而平流层的爆发性增温被很好地解释为强迫行星波在垂直传播中增长时波动与平均气流的相互作用的结果(O'Neill, A. and Youngblut, C., 1982)。

资料分析指出,观测到的定常波的西倾不能仅从经典理论中关于纯机械或纯热力强迫作用去理解,而应看成是两者的综合结果(Wallace, J. 1983^[6])。我国的理论和模拟则表明,当地形高度小于临界高度时,爬坡是主要的,大气的响应是线性的;当高度大于临界高度时,绕流是主要的,大气的响应是非线性的;而且大气对热力和机械强迫作用的综合响应也是非线性的(吴国雄, 1984)^[7]。

由于冬季定常波流型与球面 Rossby 波列十分相似,有的学者认为定常波的机制可能与 Rossby 波传播的遥距离强迫或短波作用有关。

3. 瞬变波动力学

在过去近二十年,瞬变波动力学引起人们极大的兴趣。这不仅因为其不同频谱的形态为长、中、短期天气预报提供依据,还在于不同频谱的瞬变波之间,以及瞬变波、定常波与基流之间的相互作用是大气运动中最本质和最复杂的现象之一。一般地它可分为低频瞬变波和高频瞬变波。滤波方法常被用来分离不同时间尺度的扰动。

用 $t > 40$ 天的低通滤波器对 500hPa 高度观测资料进行滤波后算得的方差分布与相应的未经滤波资料上的分布,和三十天平均资料上的分布极为相似(Blackmon, M. 1979)。这表明,时间尺度在一周以上的低频过程振幅的地理分布对频率的依赖较小;也表明位势高度振荡的频率谱中低频占优势。Wallace 和 Gutzler (1981)^[8]普查了北半球 500hPa 月平均高度场格点值的同时相关,发现了五种基本流型(即太平洋北美型 PNA、西大西洋型 WA、东大西洋型 EA、欧亚型 EU 及西太平洋型 WP),且每一流型的地理路径与大圆极为相似。这种结构在滞后相关图上也有清楚表现,只不过强度减弱。这表明低频波动的传播也遵循着大圆规律。

对大气低频变化机制的看法不一致,概言之有下述几种可能性:①外部强迫作用可导致低频变化,如赤道海温距平(EL Nino)及地形强迫激发的中高纬低频变化和阻塞(Horel 和 Wallace, 1981; Egger, 1978);②与指数循环相联系的以月为尺度的振荡;③不同平衡态流型之间的变化(Charney 和 Devore, 1979^[9]; Charney 和 Strauss, 1980^[10]);④稳定的闭合旋流(Blackmon, 1976),孤立波(即 Soliton, 见 Redekopp, L., 1977),偶极波(即 modon, 见 McWilliams, J., 1980);⑤波动间的相互作用(Egger, J. 1978);以及⑥高频瞬变波的内强迫作用(Green, J., 1977)。其实,这种

低频变化也可能与大气运动所受的约束有关。

在2.5—6天的带通滤波图上,在两大洋西部存在着显明的风暴轴(Blackmon等,1977^[11])。在高层,在风暴轴的入(出)口处存在规则的次(超)地转运动;动量与感热输送特征沿着该轴变化也十分不同(Lau, N.C., 1979^[12])。这种高频变化特性与低频波动、定常波动与带状平均量之间的关系受到普遍的关注。

Bretherton(1966)和Green(1970)^[13]在研究涡旋的作用时,得到带状平均的经向位涡输送、动量输送和感热输送的关系。Andrews, McIntyre(1976)^[14]及Edmon等(1980)引入无辐散“剩余环流”的概念,把纬向平均动量和热量的变化与涡动位涡的输送及剩余环流简明地联系在一起。在此基础上,他们又引用EP通量的概念,得到纬向平均的经向位涡输送等于EP通量的散度的关系,并导出波活动方程,使之成为研究波动和基流相互作用的一个重要工具,也加深了人们对大气活动的认识。

4. 热带气象学

纬向平均或时间平均的动力学给出的是相对均匀的低纬大气的图象。随着动力学在四维时空研究上的蓬勃发展,热带天气系统的结构、频谱、特殊性和重要性才逐渐为人们认识。Charney(1964)^[15]基于尺度分析和天气研究成果(如热带“热塔”的发现)提出的CISK(第二类条件不稳定)概念及郭晓岚(1965)提出的积云对流参数化,大大推动了近代低纬气象学的发展。

Matsuno, T.(1966)^[16]指出,行星尺度运动即使在靠近赤道处也是准地转的,因而变化缓慢的行星尺度的热带波动可用经典的潮汐理论来处理。由于热带波动理论的这一突破,使Matsuno(1966)和Longuet-Higgins, M.(1968)能用浅水波模型把Kelvin波和混合Rossby-重力波从大气波动中分离出来。Schneider, E.和Lindzen, R.(1976)提出“积云摩擦”的概念;Chang, C.P.(1977)得到对流活动的垂直混合效应类似于把热带大气考虑成强耗散系统的结论,从而改进了无粘性线性Kelvin波解的逼真度。Webster, P.(1972)和Gill, A.(1980)等曾用垂直向低分辨的模式成功地模拟出Kelvin波及混合Rossby-重力波。

赤道Kelvin波和Rossby-重力波的发现使平流层准两年振荡(QBO)得到满意的动力解释。Holton, J.和Lindzen(1972)^[17]根据此两种波EP通量的分布特征,发现在东(西)风带传播的Kelvin(Rossby-重力)波使基流减速,即向反向加速,因而QBO可解释为Kelvin波和Rossby-重力波与基流交互作用的结果。

传统上认为,低纬大气为辐射能的盈余区,扰动对辐射的影响并不重要。但Leary, C.和Houze, R.(1979)的工作证明云层对大气的入射和放射辐射有明显的阻滞作用。Webster(1980)和Lorenz, E.(1983)的研究指出,3周左右的低频振荡只有考虑了潜热时才存在。GATE和MONEX试验大大丰富了关于低纬辐射的知识。《雨云》卫星资料的分析(Webster, 1980)表明夏季沙漠地区(25°N, 10°—50°E)为净辐射源,而对流季风区(25°N, 80°—180°E)为强的辐射加热源。凝结加热也是在季风区最强。虽然感热加热与上述反相,但仅为低层现象。经向加热的这一不均匀性成为激发季风区经向环流的重要热力因子。

低纬和中纬大气相互作用的研究也有显著突破。在研究地形和冷热源对低空急流的

影响的同时,低纬季风对中纬影响的研究更深入。低纬的外部扰源如 EL Nino (厄尔尼诺)等所激发的波列向北影响中纬也广为人们重视。除了太平洋海温距平和高纬度天气系统的遥相关(Horel and Wallace, 1981; Rowntree, P., 1972)外,太平洋中纬度的风暴轴位于亚洲急流出口区,也与冬季风强烈的赤道对流密切相关(Blackmon, 等1980)。中纬度系统对低纬的影响较复杂:当基流均匀时,中纬波动只能在特征纬度附近被反射或吸收,对低纬影响不大;但当基流不均匀时,FIGGE(全球大气研究计划第一期全球试验)资料分析(Reed, R., 1981)表明,中纬波动可穿过东风带的断裂带(即弱西风区域)影响低纬度,甚至传播到另一半球的西风带中。

5. 海洋和大气的相互作用

赤道太平洋 SST (海面温度)的准周期振荡现象及它的成因和气候效应引起广泛的兴趣。人们试图从大气信风环流、海洋斜温层变化和赤道波动的角度去探索 EL Nino 的成因(McCreary, J., 1976)^[18],并从球面 Rossby 波的频散原理去探索中、高纬大气环流对赤道太平洋海温距常的遥响应。这些发现无疑将对中、长期天气预报产生深远影响。例如, Barnett, T. (1981)指出,太平洋的 SST 是一到三个季节后北美表面气温的一个有用的预报因子。

Walker 的关于赤道地区行星尺度相关的概念再次获得重视。Madden, R. 和 Julian, P. (1971)分析了赤道地区环流的東西结构,得到 Walker 环流的显著特征,为南方涛动(SO)提供较好的物理依据。其横跨太平洋的底层支与信风环流对应,与 EL Nino 相联。一个新的研究 EL Nino 与 SO 的分支 ENSO 在低纬动力学中占有重要的地位。

但由于低纬,尤其是海洋资料的缺乏,还由于低纬大气及海洋动力学的复杂性有待于进一步认识,大气和海洋相互作用的研究还仅是开端而已,尤其是大气对海洋的反作用还研究得较少。

6. 非线性动力学

把大气考虑成一个封闭系统,把大气过程考虑成线性可叠加过程的研究曾揭示了大气的许多特征。但大气动力学自身的发展及学科间的渗透,使其突破原来的线性范畴而进入了一个新阶段。大气作为一个非线性的开放系统,其不同特征正被逐渐披露:大气动力学已进入研究强迫耗散的非线性系统的新的发展阶段。

Charney and Devore (1979)^[9]在这一系统中首先得出多值平衡态的解:在同一扰源强迫的系统中,大气状态存在两个稳定的平衡态,而处在这两态之间的态是不稳定的。Wiin-Nielsen, A. (1979)则研究了低阶正压的摩擦耗散系统的定常态和稳定性特征。Vickroy, J. 和 Dutton, J. (1979)在一个类似的系统中研究解的分支、突变。Kallen, E. (1981)用一个低截谱模式对地形的非线性效应进行数值试验,得到相应的双平衡态数值解。Lorenz (1980)研究了准地转平衡的特征和吸引子问题,指出当分叉方程的系数超过某一值后,解的时间序列出现混乱的混沌状态。

非线性强迫耗散系统的动力学目前正在迅速发展,它无疑是动力气象学的重大发展,也是关于大气可预报性和长期预报的重要课题。但象任何新的理论一样,非线性动力学在迄今的发展中也受到高截谱、恒定激发源的羁绊,因而与物理机制的密切结合将是今后发展的重要方向。

二、中期数值预报的进展

由于ECMWF的中期数值天气预报业务处于领先地位，这里的介绍主要根据该中心的技术文件加以综述。

1. 从短期预报向中期预报的发展

到七十年代初，短期数值预报业务在世界范围内获重大成功。以美国国家气象中心(NMC)为例(图1, 见Shuman, F.1978)。1958年该中心开始采用一层正压涡度方程模式。在1962年引入的准地转斜压模式, 到1966年已被六层原始方程模式所代替, 卫星资料及同化技术等也已被采用。到1972年, 预报得分已比1958年增加了几乎一倍。

Miyakoda, K., 等(1971)^[19]试验证明, 模式的分辨率对长时效预报有重要影响。Smagorinsky, J. (1969)^[20]在大气环流模式(GCM)试验中发现, 直至第二周还能较好地模拟气旋的新生和生命史。1972年Miyakoda用GFDL的九层半球格点模式($d=250$ 千米)作出第一个长达二周的中期天气预报(用UNIVAC 1108机, 每天的预报需12小时)。数值预报的上述发展促进欧洲国家在1973年决定建立ECMWF。

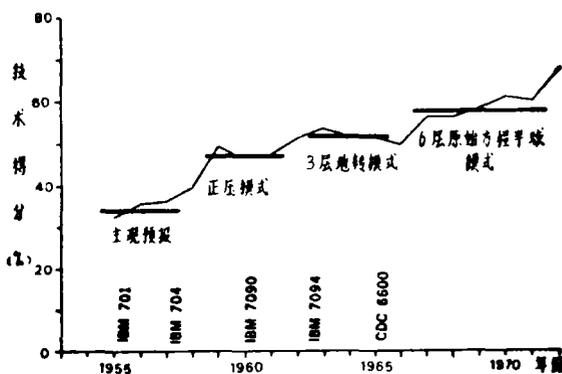


图1 NMC北半球500hPa 36小时预报年平均技术得分
水平线为模式没有重要变化期间的平均得分, 得分
为零指预报没有天气价值, 为100指完善预报

2. ECMWF的预报模式和业务

关于ECMWF的模式细节已有不少介绍。在这里只作概要说明。1979年投入业务的是 N_{48} 全球格点模式。格距 1.875 纬距 $\times 1.875$ 经距。垂直方向15层。时间积分用蛙跳格式和半隐式格式, 时间步长15分钟。1983年4月该模式被谱模式 T_{63} 代替。十天预报在Cray 1-A计算机上用了3小时50分钟, 在Cray X-MP上只需约2小时。从85年5月起采用了 T_{106} 谱模式。

模式分动力和物理两部分。除模式本身, 还发展了一套先进的资料收集、加工、同化系统, 产品加工系统及资料库。除形势预报外, 还提供包括云量、降水、湿度、海面气压、风、温度等单点要素预报。第一个冬天(1979—80)ECMWF的60%距平相关达到5.5天, 比Miyakoda 1972年的试验结果增加了近2天。在此以后, 中心的资料分析系统、初始化方案、地形方案及次网格物理过程不断更新, 预报得分也因而不断改善(图2, 图3)。

3. 未来十年

a. 未来十年计算条件估计将与过去相当的速率继续增长。但由于计算技术的进步, 计算经费的增长却不会太多。这为数值天气预报的快速发展提供了可能。到1984年ECMWF不仅使有效预报比十年前延伸了三天, 而且同样重要的是找出了限制预报时

效进一步延伸的因子,从而使有效预报在下一个十年跃进到12天成为可能。根据

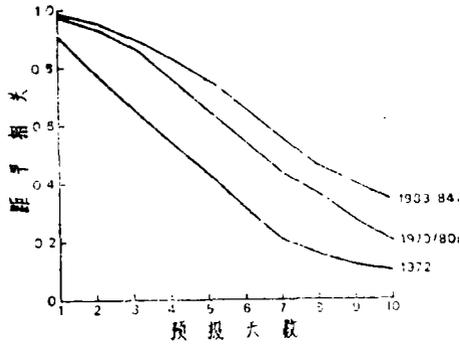


图2 ECMWF数值预报在1983/84及1979/80冬季的距平相关得分和Miyakoda 1972年发表的12个月份例子的相应得分

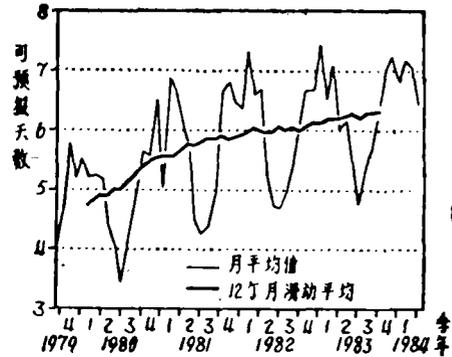


图3 ECMWF北半球预报技巧得分用1000 hPa到200hPa高度场及850hPa到200hPa温度场算得的逐日距平相关和误差标准差,再求平均而得

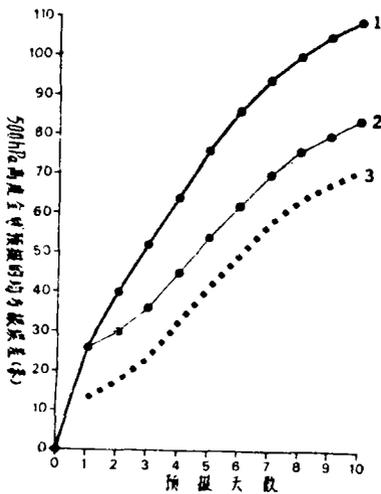


图4 500hPa高度预报全球均方根误差(米)随预报天数的变化
曲线1为1980年12月1日到1981年3月10日ECMWF所有业务预报的平均,曲线2为Lorenz(1982)用相同观测资料但采用理想模式所作的试验结果,曲线3为用理想模式,加上观测误差减半后所作的试验结果

Lorenz(1982年,参见图4)估计,在不改变目前的观测资料精度的情况下,通过减少截断误差,采用理想模式,有效预报可伸长3—4天。如果同时能使分析资料的误差减少50%,则时效还可再延伸2天。

通过世界天气监视网和卫星遥感的发展,观测资料将会进一步改善,分析质量的进一步提高将可实现。未来的步骤是提高预报模式的分辨率,改进物理过程参数化方案和资料同化系统,从而使中期预报的精度进一步提高,使预报产品及服务质量进一步发展。ECMWF计划在十年内,使中期确定预报延伸到2周,并提供全球海浪的中期预报,同时改善成员国远距离使用中心计算机的能力。

b. 预报时限的再延伸不仅受到动力可预报性的限制,还受到边界强迫可预报性的限制。前者指由于大气和模式的内在不稳定性,使起始状态的小振幅误差放大而限制预报时效。对小尺度过程不适当的参数化所造成的预报误差增长也属此类不稳定性。后者则指因缓慢变化的强迫源,如SST、海冰及雪盖等,以月的时间尺度影响着大

气环流所致。ECMWF下十年的计划希望在此方面有所突破,并发展长约4周的月业务预报。

用目前的时间积分模式进行长期预报必须克服的问题是模式气候向真实气候的漂移。Shukla, J. (1983) 针对此提出过若干距平预报方案。ECMWF 曾用此进行 500hPa 高度距平月预报试验, 其结果很令人鼓舞。

c. ECMWF 目前已根据模式预报结果向成员国提供海面上空 2 米高度气温, 10 米高度风矢等预报, 为航运、捕鱼及近海作业服务。下一个十年的目标是发展海浪预报。目前正在与汉堡 Max Planck 气象研究所合作, 准备在现有预报模式中加上第三代全球海浪模式(基于对二维波谱的辐射传输方程进行时间积分)。未来还准备以此全球海浪模式的中期预报结果作为边界值, 设计高分辨的关于东大西洋、北海、地中海和波罗的海的有限海域模式。

d. 为了实现上述目标, ECMWF 计划通过 WMO 加强 WWW(世界天气监视网), 从而获取高质量、大数量的观测资料。还计划通过加强资料同化和模拟的研究, 改进计算机硬件和软件等, 发展现有的业务预报模式。为此, 已设计出计算机更新的时间表。到 1986 年初, ECMWF 的主要计算系统将是:

主机: Cray X-MP/22; 前置机: Cyber 835, Cyber 855;

Cray-LCN 通道机: Cyber 825; 资料处理机: IBM 4341 M12;

图象处理机: VAX 11-750; 资料将储存在光学磁盘(每盘存 20—40 亿字节)。

到 1990 年, 主机估计要比 Cray X-MP/22 快 10—15 倍。主内存为十亿字节, 第二存贮为 40—320 亿字节, 由每秒 100 亿位的甚高速通道与主机联接。每一光学磁盘容量可达 320 亿字节。

主要由于成员国之间的协调和科学家之间的合作, ECMWF 在过去的十年已超额完成原定指标。未来的十年, 随着 WCRP(世界气候研究计划)的逐渐实施, 海洋资料的逐渐增加, 卫星遥感技术的逐步改进, 以及随着气象学科的发展, 可以预言, ECMWF 的十年计划将会按期完成, 世界范围的天气预报和气象服务又将是一派崭新的景象。

参 考 文 献

- [1] Hoskins, B. and Pearce, R., Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere, Academic Press, 1983.
- [2] Miyakoda, K., Hembree, G.D., Strickler, R.F. and Shulman, I., Cumulative Results of Extended Forecast Experiments, I. Model Performance for Winter Cases, Mon. Wea. Rev., Vol. 100(1972), 836—855.
- [3] Hoskins, B.J. and Karoly, D.J., The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing, J. Atmos. Sci., Vol. 38(1981), 1179—1196.
- [4] Charney, J.G. and Drazin, P.G., Propagation of the Planetary-scale Disturbance from the Lower into the Upper Atmosphere, J. Geophys. Res., Vol. 66(1961), 83—109.
- [5] Edmon, H.J., Hoskins, B.J. and McIntyre, M.E., Eliassen-Palm Cross-sections for the Troposphere, J. Atmos. Sci., Vol. 37(1980) 2300—2616 (errata vide ibid, Vol. 38(1981), 1115).
- [6] Wallace, J.M., The Climatological Mean Stationary Waves: Observational Evidence, Chapter 2, Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere, 27—54, Academic Press, 1983.

- [7] Wu Guoxiong, The Non-linear Response of the Atmosphere to Large-scale Mechanical and Thermal Forcing, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41(1984), 2456-2476.
- [8] Wallace, J.M. and Gutzler, D.S., Teleconnections in the Geopotential Height Field During the Northern Hemisphere Winter, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109(1981), 785-812.
- [9] Charney, J.G. and Devore, J.G., Multiple Flow Equilibria in the Atmosphere and Blocking, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 36(1979), 1205-1216.
- [10] Charney, J.G. and Strauss, D.M., Form-drag Instability, Multiple Equilibria and Propagating Planetary Waves in Baroclinic Orographically Forced Planetary Wave Systems, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 37(1980), 1157-1176.
- [11] Blackman, M.L., Wallace, J.M., Lau, N.-C. and Mullen, S.L., An Observational Study of the Northern Hemisphere Wintertime Circulation, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34(1977), 1040-1053.
- [12] Lau, N.-C., The Observed Structure of Tropospheric Stationary Waves and the Local Balances of Vorticity and Heat, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 36(1979), 996-1016.
- [13] Green, J.S.A., Transfer Properties of the Large-scale Eddies and the General Circulation of the Atmosphere, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 96(1970), 157-184.
- [14] Andrews, D.G. and McIntyre, M.E., Planetary Waves in Horizontal and Vertical Shear: The Generalized Eliassen-Palm Relation and the Mean Zonal Acceleration, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 33(1976), 2031-2048.
- [15] Charney, J.G. and Eliassen, A., On the Growth of the Hurricane Depression, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 21(1964), 68-75.
- [16] Matsuno, T., Quasi-geostrophic Motions in the Equatorial Area, *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 44(1966), 25-42.
- [17] Holton, J.R. and Lindzen, R.S., An Updated Theory for the Quasi-biennial Cycle of the Tropical Stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 29(1972), 1076-1080.
- [18] McCreary, J.P., Eastern Tropical Ocean Response to Changing Wind Systems, With Application to El Niño, *J. Phys. Ocean.*, Vol. 6(1976), 832-845.
- [19] Miyakoda, K., Strickler, R.F., Noppo, C.J., Baker, P.L. and Hembree, G.D., The Effect of Horizontal Grid Resolution in an Atmospheric Circulation Model, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 28 No. 4, 481-499, 1971.
- [20] Smagorinsky, J., Problems and Promises of Deterministic Extended Range Forecasting, *Bull. Amer. Met. Soc.*, Vol. 50(1969), 286-311.